

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Definisi Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan Windmill.

Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Walaupun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (Contoh: PLTD, PLTU, dll), turbin angin masih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak terbaharui (Contoh : batubara, minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik.

2.2 Kecepatan angin

Secara umum angin dibagi menjadi beberapa kelas. Skala yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin baik di darat maupun laut adalah skala Beaufort. Skala Beaufort dimulai dari angka 0 untuk hembusan angin yang paling tenang hingga angka 12 yang bersifat berbahaya dan menghancurkan.

Tabel 2.1 Skala angin Beaufort

Nomor Beaufort	Kekuatan angin	Kecepatan angin rata-rata (km/jam)	Kecepatan angin rata-rata (m/s)
0	Tenang	0	0
1 -3	Sedikit tenang	≤ 19	$\leq 5,27$
4	Hembusan angin sedang	20-29	5,55-8,05
5	Hembusan angin sejuk	30-39	8,33-10,83
6	Hembusan angin kuat	40-50	11,11-13,88
7	Mendekati kencang	51-61	14,16-16,94
8	Kencang	62-74	17,22-20,55
9	Kencang sekali	75-87	20,83-24,16
10	Badai	88-101	24,44-28,05
11	Badai dahsyat	102-117	28,33-32,5
12	Badai topan	>118	$>32,77$

(sumber : sugiharyanto, 2017)

2.3 Daya angin

Potensi sumber energi angin dan daya yang mampu dihasilkan dapat dihitung dari data kecepatan angin yang diperoleh. Melalui gambar 2.1 kita dapat menghitung aliran massa udara $\frac{dm}{dt}$ yang melalui luas penampang rotor A (m²).

Angin adalah udara yang bergerak. Udara mempunyai massa jenis tetapi berdensitas rendah. Ketika massa bergerak dengan kecepatan V maka energi kinetiknya sebagai berikut:

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \text{ (J)} \quad (2.1)$$

Jika massa jenis dari udara yang bergerak dilambangkan sebagai ρ maka energi kinetik per volume udara adalah:

$$E_v = \frac{1}{2}\rho V^2 \text{ (Jm}^{-3}\text{)} \quad (2.2)$$

Jika kita asumsikan arah angin tegak lurus terhadap penampang A maka V per sekon volume melewati penampang A.

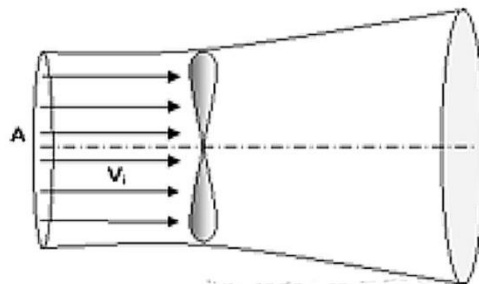
Maka aliran V per sekon yang melewati A adalah:

$$\phi_v = V.A \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)} \quad (2.3)$$

Energi yang mengalir melalui udara adalah energi kinetik dari udara yang mengalir melewati penampang A per sekon. (Jansen, Smulder. Rotor Design For Horizontal Axis)

Maka energi yang terdapat di angin:

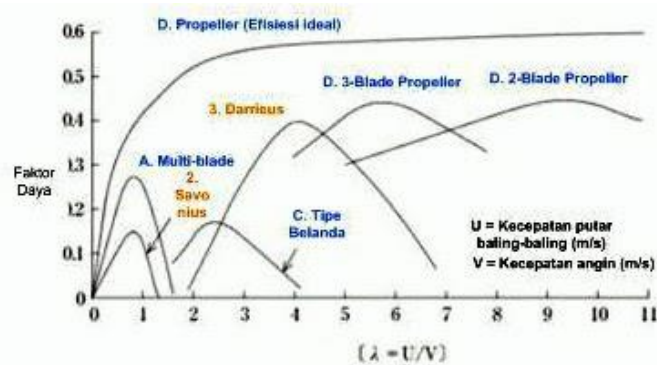
$$P_{air} = \frac{1}{2}\rho V^3 A \text{ (W)} \quad (2.4)$$



Gambar 2.1 Arah angin terhadap penampang A

Daya sebenarnya adalah daya yang keluar dari generator dalam bentuk daya elektrik maksimum, dan juga dapat dinyatakan sebagai daya diperlukan atau dikehendaki atau daya disain. Daya ini sangat dipengaruhi oleh efisiensi bilah sudu yang dinyatakan dalam koefisien daya dan efisiensi mekanikal lainnya.

$$P_{max} = \eta_g \cdot \eta_b \cdot \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot A \cdot V^3 \quad (2.5)$$



Gambar 2.2 Kurva prestasi berbagai jenis turbin angin

Sebagai catatan bahwa:

1. Kepadatan energi sebanding dengan densitas udara. Untuk kondisi standar (15° dari permukaan laut) densitas udara adalah $1,225 \text{ kg/m}^3$.
2. Energi dari angin sebanding dengan luas penampang rotor.
3. Kepadatan energi angin sebanding dengan volume dari kecepatan angin.

2.4 Klasifikasi Turbin Angin

Turbin angin sebagai mesin konversi energi dapat digolongkan berdasarkan prinsip aerodinamik yang bekerja pada rotornya. Berdasarkan prinsip aerodinamik, turbin angin dibagi menjadi dua bagian yaitu jenis drag (tipe drag) dan jenis lift (tipe lift) (Hemami, 2012). Kedua prinsip aerodinamik yang dimanfaatkan turbin angin memiliki perbedaan putaran pada rotornya, dengan prinsip gaya drag memiliki putaran rotor relatif rendah dibandingkan turbin angin yang rotornya menggunakan prinsip gaya lift.

Jika dilihat dari arah sumbu rotasi rotor, turbin angin dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu horizontal axis wind turbine (HAWT) dan vertical axis wind turbine (VAWT) (Mathew, 2006).

2.4.1 Turbin angin sumbu horizontal (TASH)

Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. TASH sebagian besar memiliki sebuah gearbox yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar.

Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan.

Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar TASH merupakan mesin upwind (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin downwind (menurut jurusan angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resintensi angin dari bilah-bilah itu.



Gambar 2.3 Turbin TASH

Kelebihan turbin angin sumbu horizontal (TASH) :

Dasar menara yang tinggi membolehkan akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin (perbedaan antara laju dan arah angin antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi. Di sejumlah lokasi geseran angin, setiap sepuluh meter ke atas, kecepatan angin meningkat sebesar 20%.

Kekurangan TASH :

- a. Menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkut. Diperkirakan besar biaya transportasi bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin
- b. TASH yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yangampil.
- c. Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, gearbox, dan generator
- d. TASH yang tinggi bisa memengaruhi radar airport

- e. Ukurannya yang tinggi merintangi jangkauan pandangan dan mengganggu penampilan lansekap
- f. Berbagai varian downwind menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi
- g. TASH membutuhkan mekanisme kontrol *yaw* tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin

2.4.2 Turbin angin sumbu vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal/tegak (atau TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah.



Gambar 2. 4Turbin TASV

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta gearbox bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Tapi ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang

berdenyut. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar.

Karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga yang tersedia adalah energi angin yang sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan obyek yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan *bearing wear* yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasangi menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal.

Kelebihan turbin angin sumbu vertikal (TASV) :

- a. Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
- b. Karena bilah-bilah rotornya vertikal, tidak dibutuhkan mekanisme yaw.
- c. Sebuah TASV bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian-bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.
- d. TASV memiliki sudut airfoil (bentuk bilah sebuah baling-baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi *drag* pada tekanan yang rendah dan tinggi.
- e. Desain TASV berbilah lurus dengan potongan melintang berbentuk kotak atau empat persegi panjang memiliki wilayah tiupan yang lebih besar untuk diameter tertentu daripada wilayah tiupan berbentuk lingkarannya TASH.

- f. TASV memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada TASH. Biasanya TASV mulai menghasilkan listrik pada 10 km/jam (6 m.p.h.)
- g. TASV biasanya memiliki *tip speed ratio* (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya angin) yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinannya rusak di saat angin berhembus sangat kencang.
- h. TASV bisa didirikan pada lokasi-lokasi dimana struktur yang lebih tinggi dilarang dibangun.
- i. TASV yang ditempatkan di dekat tanah bisa mengambil keuntungan dari berbagai lokasi yang menyalurkan angin serta meningkatkan laju angin (seperti gunung atau bukit yang puncaknya datar dan puncak bukit),
- j. TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.
- k. Kincir pada TASV mudah dilihat dan dihindari burung.
- l. Kekurangan dari TASV :
- m. Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi TASH karena drag tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.
- n. TASV tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.
- o. Kebanyakan TASV mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
- p. Sebuah TASV yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

2.5 Desain sudu

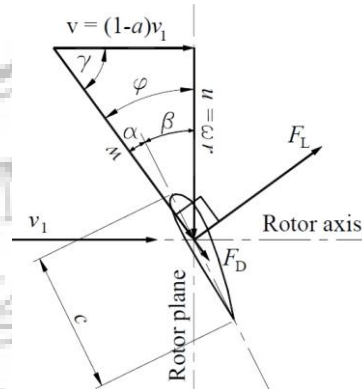
Sudu adalah bagian dari turbin angin yang bertugas menerima energi kinetik angin dan merubahnya menjadi energi gerak putar (mekanik) pada poros penggerak. Pada sebuah turbin angin jumlah sudu dapat berjumlah 1,2,3 atau lebih.

Kelebihan dan kekurangan dari jumlah masing-masing sudu adalah sebagai berikut:

- 1) Jumlah sudu 1
 - a. Mengurangi ratio gearbox
 - b. Speed lebih tinggi yang berarti lebih berisik dan lebih beresiko mengenai hewan khususnya burung
 - c. Blade lebih mudah dipasang
 - d. Menangkap 10% energi lebih sedikit ketimbang desain dengan 2 sudu
- 2) Jumlah sudu 2
 - a. Membutuhkan peredam beban karena ketidakseimbangan giroskopis
 - b. Menangkap 5% energi lebih sedikit ketimbang desain dengan 3 sudu
 - c. Kekurangan dan kelebihan lainnya kurang lebih hampir mirip dengan desain 1 sudu
- 3) Jumlah sudu 3
 - a. Lebih seimbang
 - b. Speed yang lebih rendah
 - c. Meningkatkan rasio gearbox
 - d. Bentuk lebih umum dan lebih aman untuk hewan khususnya burung

Turbin angin memanfaatkan prinsip *lift* dan *drag* untuk memutar rotor. Energi yang dibangkitkan oleh turbin angin ditunjukkan oleh persamaan 2.19, dimana P adalah power (watt), T adalah torsi (Nm), dan ω (rad) adalah kecepatan angular *blade* turbin angin.

$$P = T \cdot \omega \quad (2.6)$$



Gambar 2.5 Sudut serang dan garis chord airfoil

Gaya sirkumferensial atau torsi T diperoleh dari:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{60P}{\pi D n} = \frac{30P}{\pi R n} \quad (2.7)$$

Gaya aksial, atau axial thrust diperoleh sebagai berikut:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho A (V_i^2 - V_e^2) = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} D^2 (V_i^2 - V_e^2) = \frac{\pi}{8} \rho D^2 (V_i^2 - V_e^2) \quad (2.8)$$

Gaya aksial turbin pada operasi efisiensi maksimum dimana $V_e = 1/3 V_i$ diperoleh

$$F_x = \frac{\pi}{8} \rho D^2 (V_i^2 - V_e^2) = \frac{\pi}{8} \rho D^2 \left(V_i^2 - \frac{1}{9} V_i^2 \right) = \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{9} \right) \rho D^2 V_i^2 \quad (2.9)$$

Maka gaya aksial turbin adalah:

$$F_x = \frac{\pi}{9} \rho D^2 V_i^2 \quad (2.10)$$

Gaya aksial ini sangat penting dalam disain bantalan aksial, menara, pondasi dan kawat penahan.

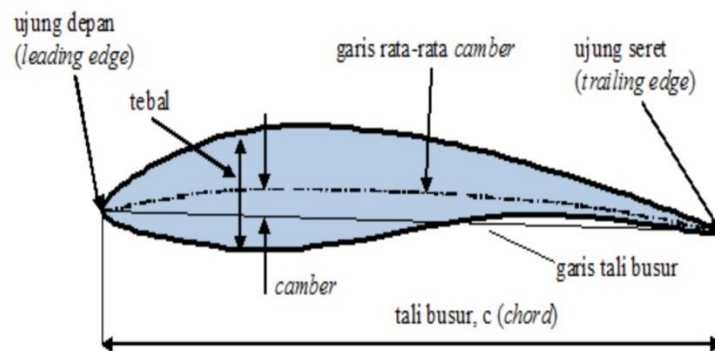
2.5.1 Airfoil sudu

Secara umum turbin angin menggunakan dua macam jenis airfoil yaitu NACA dan NREL.

A. NACA

Airfoil NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) adalah salah satu bentuk bodi aerodinamika sederhana yang berguna untuk dapat memberikan gaya angkat tertentu terhadap suatu bodi lainnya dan dengan bantuan penyelesaian matematis sangat memungkinkan untuk memprediksi berapa besarnya gaya angkat yang dihasilkan oleh suatu bodi *airfoil*. Geometri *airfoil* memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik aerodinamika dengan parameter penting berupa CL, dan kemudian akan terkait dengan lift (gaya angkat yang dihasilkan) (Mulyadi, 2010).

Hingga sekitar Perang Dunia II, *airfoil* yang banyak digunakan adalah hasil riset Gottingen. Selama periode ini banyak pengajuan *airfoil* dilakukan diberbagai negara, namun hasil riset NACA lah yang paling terkemuka. Pengujian yang dilakukan NACA lebih sistematis dengan membagi pengaruh efek kelengkungan dan distribusi ketebalan atau thickness serta pengujiannya dilakukan pada bilangan Reynold yang lebih tinggi dibanding yang lain. Hal ini sering dirangkum oleh beberapa parameter seperti: ketebalan maksimum, maksimum bentuk melengkung, posisi max ketebalan, posisi maks bentuk melengkung, dan hidung jari-jari. Seperti terlihat pada gambar 2.7 suatu *airfoil* terdiri dari:



Gambar 2.7 Bagian-bagian airfoil

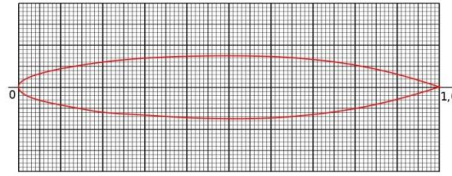
Berikut adalah identifikasi angka-angka dari seri NACA tersebut :

1) Seri satu

- Angka pertama menunjukkan serinya.
- Angka kedua menunjukkan letak tekanan minimum dalam persepuluh chord dari trailing edge.
- Angka ketiga menunjukkan koefisien gaya angkat C_l rancangan dalam persepuluh chord.
- Dua angka terakhir menunjukkan ketebalan maksimum (maximum thickness) dalam perseratus chord.

Contoh airfoil dengan NACA 16-123, angka 1 adalah serinya (seri satu angka), memiliki letak tekanan minimum 60 % chord dari trailing edge, memiliki koefisien gaya angkat rancangan 0.1 dan mempunyai ketebalan maksimum 23 % chord

NACA 16-015



Gambar 2.7 Contoh NACA seri satu

2) Seri enam

- Angka pertama menunjukkan serinya.
- Angka kedua menunjukkan letak tekanan minimum dalam sepersepuluh trailing edge.
- Angka ketiga menunjukan koefisien gaya angkat (c_l) rancangan dalam sepersepuluh chord.
- Dua angka terakhir adalah maksimum thickness dalam seperseratus chord.

Misalnya untuk airfoil dengan NACA 65-218, angka 6 adalah serinya (seri enam angka), tekanan minimum terjadi pada $0.5c$ untuk distribusi tebal simetrik/dasar pada gaya angkat nol, memiliki koefisien gaya angkat rancangan c_l $0.2c$, dan tebal maksimum 18% chord. Airfoil jenis ini dirancang sebagai airfoil laminar untuk kecepatan tinggi, dirancang untuk menghasilkan c_{lmax} yang tinggi dan c_d yang lebih rendah pada c_l yang tinggi.

3) Seri tujuh

- Angka pertama adalah serinya.
- Angka kedua adalah letak tekanan minimum pada bagian upper surface perseratus chord.

- Angka ketiga adalah letak tekanan minimum pada bagian lower surface perseratus chord.
- Satu huruf menunjukkan profil standar dari airfoil.
- Angka kelima adalah koefisien gaya angkat rancangan dalam persepuluh chord.
- Dua angka terakhir adalah ketebalan maksimum dalam perseratus chord.

Contoh airfoil NACA 71-2A315, angka 7 adalah serinya, mempunyai letak tekanan minimum 10 % chord dari trailing edge pada upper surface, letak tekanan minimum pada lower surface pada 20 % chord dari trailing edge, menggunakan standar “ A “ airfoil, memiliki koefisien gaya angkat rancangan 0.3, dan mempunyai ketebalan maksimum 15 % chord

4) Seri delapan

Identifikasi pada airfoil ini sama dengan airfoil pada seri 7, namun angka 8 merupakan serinya. Airfoil seri delapan merupakan airfoil superkritis, di desain supaya aliran udara yang melewati bagian upper dan lower surface pada airfoil dibuat lebih maksimum dan drag yang dihasilkan seminim mungkin. Ciri-ciri airfoil ini mempunyai chamber yang besar dan radius yang besar pada leading edge, biasanya digunakan pada pesawat yang mempunyai kecepatan transonic ($0.8 < M < 1.2$).

5) Seri empat angka

- Angka pertama adalah maksimum camber dalam perseratus chord.
- Angka kedua adalah posisi maksimum camber pada chord line dalam sepersepuluh chord dari leading edge.
- Dua angka terakhir dalam maksimum thickness dalam seperseratus chord.

Misalnya untuk airfoil dengan NACA 2412 (seri empat angka) memiliki camber maksimum $0.02c$ terletak di $0.4c$ dari leading edge, dan maximum thickness atau tebal maksimum $0.12c$. Dalam praktek, umumnya angka-angka ini dinyatakan dalam persen tali busur, yaitu : camber 2% di 40% c dengan tebal 12%

6) Seri lima angka

- Bila angka pertama dikalikan $\frac{3}{2}$ memberikan koefisien gaya angkat (c_l) rancangan dalam sepersepuluh.
- Dua angka berikutnya, bila dibagi dua menunjukkan letak maksimum camber di chord line dalam seperseratus chord diukur dari leading edge.
- Dua angka terakhir menunjukkan maksimum thickness dalam seperseratus chord.

Misalnya untuk airfoil dengan NACA 23012, memiliki koefisien gaya angkat rancangan 0.3, chamber maksimum terletak di $0.15c$, dan tebal maksimum $0.12c$. Koefisien gaya angkat rancangan adalah koefisien gaya angkat teoritis airfoil dengan arah aliran bebas sejajar dengan garis singgung mean chamber line di leading edge.

B. NREL

Selama beberapa dekade penggunaan famili airfoil NACA 44XX, NACA 23XXX, NACA 63XXX dan NASA LS(1) untuk turbin angin sumbu horizontal telah mengalami penurunan performa dari efek kekasaran akibat kontaminasi tepi depan sudu. Penurunan performa ini berakibat fatal dan berakibat pada menurunnya C_l (coefficient lift) sepanjang sudu. Maka untuk meminimalisir efek penurunan performa ini maka NREL (National Renewable Energy Laboratory) mengembangkan airfoil jenis baru.

Tabel 2.2 Peningkatan performa airfoil NREL

Turbine Type	Roughness Insensitive $c_{l,max}$	Correct Reynolds Number	Low Tip $c_{l,max}$	Total Improvement
Stall-Regulated	10% to 15%	3% to 5%	10% to 15%	23% to 35%
Variable-Pitch	5% to 15%	3% to 5%	---	8% to 20%
Variable-RPM	5%	3% to 5%	---	8% to 10%

Tujuh famili airfoil NREL telah diciptakan sejak tahun 1984 dan memiliki 23 jenis airfoil. Airfoil yang dimulai dengan S801 sampai S823 adalah kode yang mewakili airfoil yang didesain dari tahun 1984 hingga tahun 1993.

Tabel 2.3 Tujuh famili airfoil NREL

Blade Length (meters)	Generator Size (kW)	Thickness Category	Airfoil Family (root-----tip)			
1-5	2-20	thick		S823		S822
5-10	20-150	thin		S804	S801	S803
5-10	20-150	thin	S808	S807	S805A	S806A
5-10	20-150	thick		S821	S819	S820
10-15	150-400	thick	S815	S814	S809	S810
10-15	150-400	thick	S815	S814	S812	S813
15-25	400-1000	thick		S818	S816	S817

(J. L. Tangier & D. M. Somers - NREL Airfoil families of HAWTs, 1995)

a) Sudu dengan panjang 1-5 meter

Famili airfoil yang terdiri dari airfoil pangkal S823 dan airfoil ujung S822 didesain pada tahun 1993 untuk turbin angin berkapasitas 2-20 kW. Famili ini mempunyai C_l maksimum 1,0 dan C_d minimum 0,010 serta memiliki bilangan reynold 600.000. jenis airfoil ini sangat cocok digunakan untuk turbin dengan variabel rpm yang kecil.

b) Sudu dengan panjang 5-10 meter

Famili airfoil ini didesain khusus untuk turbin berkapasitas 20-100 kW. Famili ini didesain khusus memiliki C_l yang rendah (1,0) dan memiliki bilangan reynold lebih dari 1.000.000 . Famili airfoil ini sangat cocok digunakan untuk blade bertipe stall regulated.

c) Sudu dengan panjang 10-15 meter

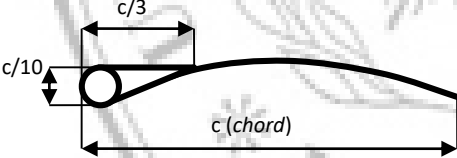

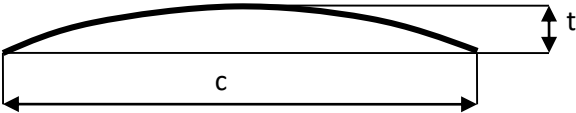
Famili ini didesain untuk rotor dengan kapasitas besar (100-400 kW). Famili pertama didesain pada tahun 1986 termasuk seri S809, S810 dan

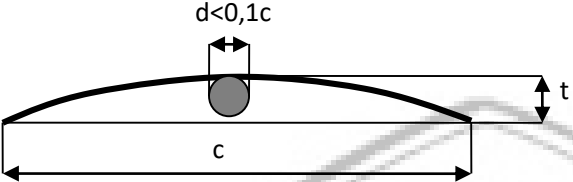
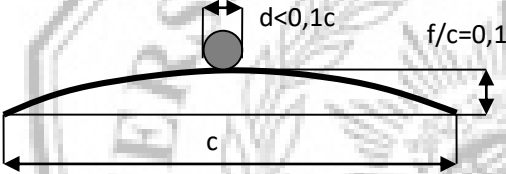
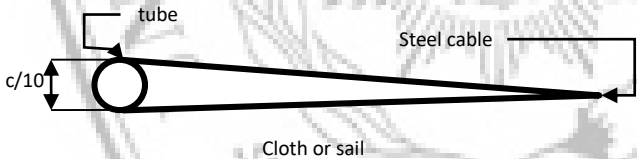
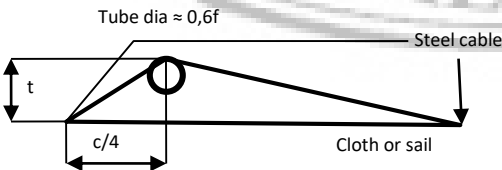
S811. Famili kedua didesain pada tahun 1988 yaitu seri S812, S813, S814 dan yang paling baru seri S815.

d) Sudu dengan panjang 15-25 meter

Famili ini digunakan hanya untuk rotor berukuran sangat besar, biasanya berkapasitas 400-1000 kW. Seri yang termasuk famili ini diantaranya: S816, S817 dan S818

Bentuk-bentuk Airfoil pada Bilah-sudu turbin angin sebagaimana tabel dan gambar berikut merupakan hasil riset yang telah dilakukan oleh beberapa pakar dan dikutip dari Jensen dkk dalam bukunya Rotor Design for Horizontal Windmills, Eindhoven. Jika t adalah tebal bilah-sudu, c adalah panjang tali busur (chord), C_D adalah koefisien Drag, C_L adalah koefisien lift dan α adalah sudut serang, maka daftar profil bentuk bilahsudu sebagaimana tabel 2.4

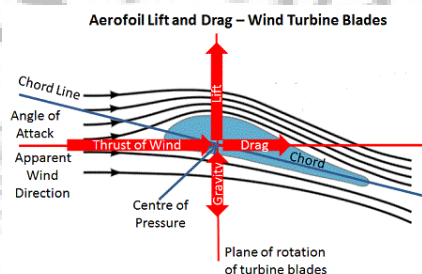
No	Nama Airfoil dan Deskripsi Geometrikal	t/c	C_D/C_{Lmin}	α^0	C_L
1	Kutup dan layar (<i>sail and pole</i>)				
			0,1	5	0,8
2	Plat baja lurus (<i>flat steel plate</i>)				
			0,1	4	0,4
3	Plat baja lengkung (<i>arched steel plate</i>)				
		$t/c=0,07$ $t/c=0,1$	0,02 0,02	4 3	0,9 1,25

No	Nama <i>Airfoil</i> dan Deskripsi Geometrikal	t/c	C_D/C_{Lmin}	α^0	C_L
4	Pelat baja lengkung dengan pipa didalam sisi cekung (<i>arched steel plate with tube on concave side</i>)				
		$t/c=0,07$ $t/c=0,1$	0,05 0,05	5 4	0,9 1,1
5	Pelat lengkung dengan pipa di sisi cembung (<i>arched steel plate with tube on convex side</i>)				
		0,1	0,2	14	1,25
6	Sayap Layar (<i>sail wing</i>)				
		$\approx 0,1$	0,05	2	1,0
7	Trouser layar (<i>sail trouser</i>)				
		$\approx 0,1$	0,1	4	1,0
8	NACA 4412		0,01	4	0,8
9	NACA 23015		0,01	4	0,8

(Jansen, Smulder. Rotor Design For Horizontal Axis)

2.5.2 Gaya angkat dan gaya hambat

Ketika sebuah benda apapun bergerak melalui sebuah fluida, suatu interaksi antara benda dengan fluida terjadi. Gaya resultan dengan arah yang sama (sejajar) kecepatan hulu disebut sebagai gaya hambat (*drag*), D , dan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai gaya angkat (*lift*), L . Untuk turbin angin bertipe horizontal membutuhkan gaya angkat (*lift*) yang besar dan sebisa mungkin membuat gaya hambat (*drag*) kecil. Sedangkan untuk turbin angin bertipe vertikal dilakukan hal sebaliknya.



Gambar 2.8 Ilustrasi gaya angkat dan gaya hambat

Hambatan atau drag bisa terjadi karena geseran viskos yakni hambatan gesekan kulit pada aerofoil atau bilah sudu akibat tekanan (aliran normal terhadap permukaan rata), akibat efek gravitasi, atau akibat efek kompresibilitas.

Jika kecepatan angin V_i menerpa airfoil dengan luas bidang bagian bawah A mengakibatkan adanya perbedaan tekanan dan hambatan viskos pada ujung bagian belakang, maka perbandingan gaya hambatan terhadap terhadap energi kinetik angin disebut sebagai koefisien hambatan

Koefisien gaya hambat adalah:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_i^2 A} \quad (2.11)$$

Dan koefisien gaya angkat adalah:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.12)$$

Dimana:

C_D = koefisien gaya hambat (drag)

C_L = koefisien gaya angkat (lift)

ρ = densitas fluida (kg/m³)

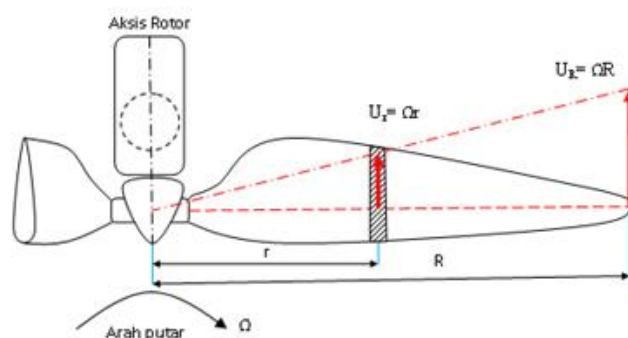
A = luasan acuan (m²)

c = panjang chord (m)

V = kecepatan fluida relatif terhadap obyek (m/s)

2.5.3 Tip speed ratio (TSR)

Tip speed ratio adalah perbandingan antara kecepatan ujung blade dengan kecepatan angin yang melaluinya. Bila $TSR > 1$ artinya lebih banyak bagian blade yang mengalami gaya angkat. Apabila $TSR < 1$ artinya lebih banyak bagian blade yang mengalami gaya hambat. Sebisanya mungkin kita mendesain blade dengan $TSR > 1$ guna mendapat gaya angkat lebih banyak.

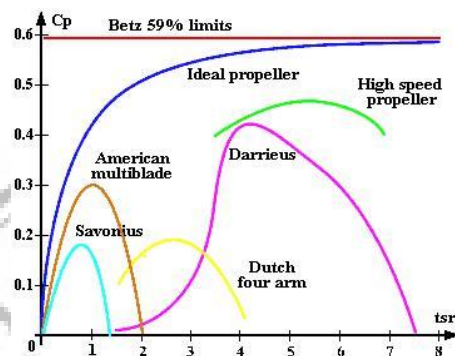


Gambar 2. 9 Ilustrasi TSR

TSR dapat ditulis dalam persamaan;

$$\lambda = \omega \cdot \frac{R}{V} \quad (2.13)$$

Sedangkan hubungan antara TSR dengan jumlah blade (B) ditunjukkan dalam gambar dan grafik sebagai berikut:



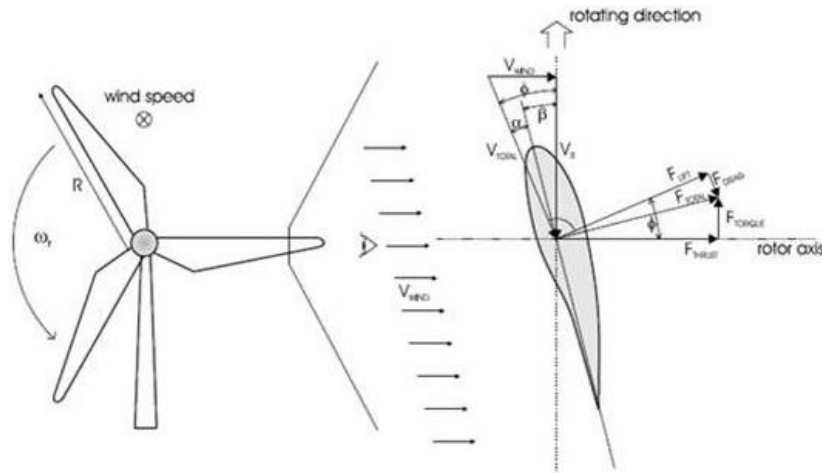
Gambar 2. 10 Hubungan TSR dengan jumlah blade

Tabel 2.5 Hubungan TSR dan B

λ	1	2	3	4	5-8	8-15
B	6-20	4-12	3-6	2-4	2-3	1-2

2.6 Geometri bilah sudu turbin angin

Dalam mendesain bilah sudu harus mengatur sudut beta (gambar 2.12) agar dapat menentukan tali busur pada bilah sudu. Angin menghembus dari arah berlawanan dengan arah gerak bilah sudu dan menghasilkan gaya angkat dan gaya hambat. Dalam prakteknya, kebanyakan bentuk menghasilkan kurva gaya angkat/hambatan yang baik jika sudut serang 5 derajat. Sebagai prinsip umum, jika data detail belum dapat diperoleh, untuk mendapatkannya dapat ditetapkan dengan (Piggot, 2006)



Gambar 2. 11 Sudut serang dan gaya pada sudu

Dalam prakteknya, kebanyakan bentuk menghasilkan kurva gaya angkat/hambatan yang baik jika sudut serang 5 derajat. Sebagai prinsip umum, jika data detail belum dapat diperoleh, untuk mendapatkannya dapat ditetapkan dengan (Piggot, 2006)

$$\beta = \Phi - 5 \quad (2.14)$$

Sedangkan untuk panjang chord mampu dicari dengan:

$$C = \frac{8\pi r}{BC_l} (1 - \cos\phi) \quad (2.15)$$